

# Clasificación morfológica de los rellenos en el trasdós de bóvedas de fábrica

## *Classification of backfill at the extrados of masonry vaults*

A. Ramos<sup>(\*)</sup>, J. León<sup>(\*\*)</sup> (\*\*\*)

### RESUMEN

En este artículo se establece una clasificación de los diferentes tipos de rellenos (rígidos o cementados, granulares firmes o sueltos y aligerados) situados en el trasdós de bóvedas y que han podido datarse en diferentes construcciones históricas en el ámbito geográfico de la Península Ibérica. Estos rellenos, tal y como pretende demostrar el estudio más amplio y del que se extrae el presente artículo, tienen una importancia vital para la estabilidad estructural de estas construcciones. Además de la clasificación, se establecen los patrones tipo con los que se encuentran estos rellenos y se introducen algunas de las consideraciones estructurales que deben tenerse en cuenta si se consideran estructuralmente.

### SUMMARY

*This paper proposes a classification of the different type of backfill (granular, stiff or masonry backup) at the extrados of vaults of historical masonry buildings scattered throughout the Iberian Peninsula. This study, in the mainframe of a broader research program, highlights the structural significance, rather disregarded in literature, of the backfill regarding the structural stability of such constructions. Furthermore, the most common patterns of the arrangement of masonry backup and backfill, as well as some structural considerations, are depicted to illustrate how to evaluate their structural contribution.*

876-13

**Palabras clave:** Construcciones históricas; fábrica; bóveda; relleno.

**Keywords:** Historical construction; masonry; vault; backfill; masonry backup.

(\*) Departamento de estructuras de TYPSA

(\*\*) FHECOR Ingenieros Consultores

(\*\*\*) Universidad Politécnica de Madrid

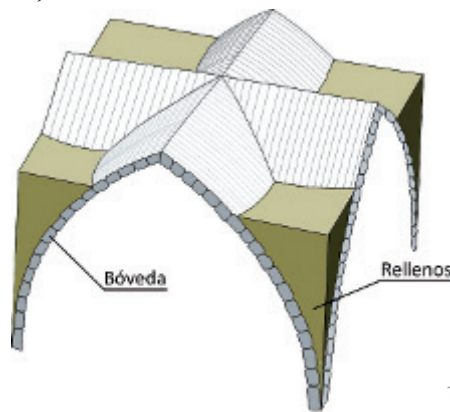
Persona de contacto/Corresponding author: aramos@typsa.es (A. Ramos)

1. Esquema de la disposición de estos rellenos en una bóveda de crucería.

2. a) Sección de la bóveda del evangelio de la iglesia de "La Mantería" antes de su ruina.  
b) Modelo de la línea de presiones, que requiere la existencia de un relleno rígido competente para garantizar el equilibrio.

## 1. INTRODUCCIÓN

Una buena parte del valor patrimonial y monumental que ha llegado hasta nuestro tiempo está formado por edificios de fábrica (sillería, mampostería, elementos cerámicos u hormigones o morteros en masa). Los procesos de degradación, los cambios de sollicitaciones respecto del origen y las diversas restauraciones o intervenciones a las que se ven sometidas no siempre son inocuos para su estabilidad. En este sentido, el presente artículo destaca la importancia estructural que tienen los rellenos colocados sobre el trasdós de bóvedas y cúpulas, como se esquematiza en la Figura 1. Llama la atención lo poco que se conoce del papel de los rellenos y el escaso tratamiento que ha recibido esta cuestión en la literatura especializada. Incluso, con alguna frecuencia, los rellenos han sido considerados como cargas inútiles, sin misión alguna y hasta objeto de eliminación deseable.



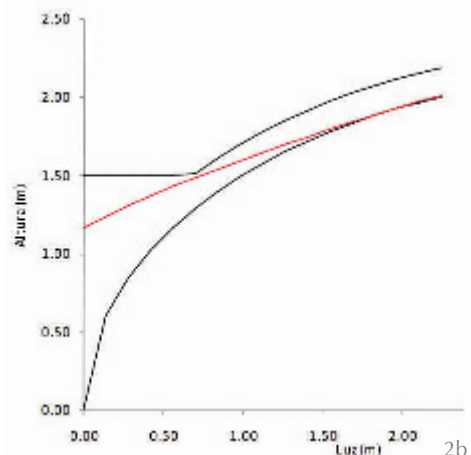
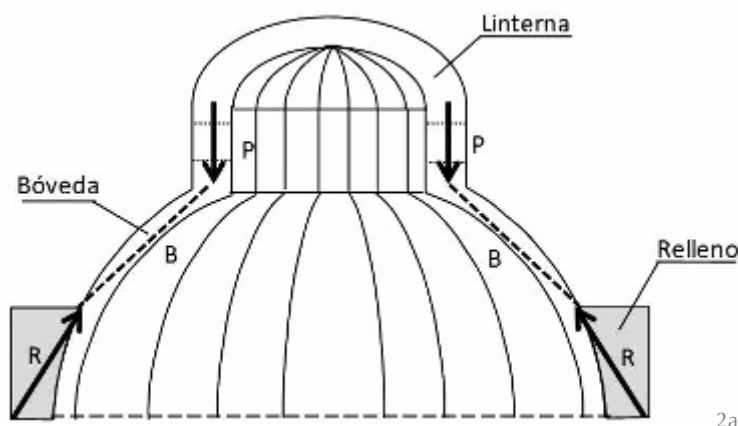
Como ejemplo de la importancia estructural de cómo estos rellenos sirven para asegurar la estabilidad de las bóvedas o cúpulas puede traerse el ejemplo del colapso de la bóveda del evangelio en la iglesia de "La Mantería" en Zaragoza. Según los estudios (1), (2) y (3) de la bibliografía parece que dicho colapso se debió, al menos en parte, a la eliminación de los rellenos del trasdós de la misma durante unas labores de restauración.

La Figura 2 esquematiza cómo un relleno "estructural" de altura adecuada permite que circule a su través una "biela" (B) que es la encargada de transmitir el elevado peso de la linterna (P) al resto de la estructura (R). La eliminación no suficientemente meditada de los rellenos propició que la cúpula colapsara al perder el equilibrio.

En los puentes de fábrica es bien conocida la existencia y tipología de los rellenos (rígidos y granulares) en el trasdós de las bóvedas de fábrica, así como su misión estructural (reparto de cargas, precarga de la bóveda y redistribución de empujes según la deformación de las bóvedas) (4) (5) (6). Esta misión estructural está íntimamente ligada a la caracterización mecánica y estructural de esas estructuras. De igual forma, los rellenos dispuestos en el trasdós de las bóvedas en edificaciones históricas de fábrica juegan un papel no pocas veces fundamental en el funcionamiento estructural de las propias bóvedas o cúpulas, y en el funcionamiento del resto de elementos del conjunto (arbotantes, pilares, contrafuertes...).

El presente artículo forma parte de un estudio más amplio en el que los autores están intentando concretar y cuantificar la importancia de estos rellenos. En este artículo se sintetizan los estudios desarrollados acerca de las diferentes tipologías de los rellenos dispuestos en el trasdós de las bóvedas y cúpulas de los edificios históricos de fábrica en el contexto geográfico de la Península Ibérica. Además se intentan establecer las principales misiones estructurales que tienen estos rellenos.

No hay que olvidar que el planteamiento de una caracterización mecánica y estructural no tiene otro fin que, en una etapa posterior, poder explicar y cuantificar la importancia de cada una de las diferentes clases de relleno. En este artículo tan sólo se presentarán de forma conceptual las misiones atribuibles a los mismos.



El artículo se esquematiza en tres bloques principales:

- Caracterización morfológica. Las características propias de los rellenos son necesarias para una correcta clasificación. La clasificación parte de la caracterización mecánica de los mismos, sin perder de vista el diferente comportamiento estructural de cada tipología. Para una correcta clasificación deberán conocerse los parámetros mecánicos (módulo de deformación, coeficiente de Poisson...) o geotécnicos (ángulo de rozamiento, cohesión, módulo de balasto...) según sea su naturaleza, así como sus características de peso propio y humedad. A priori, en un primer análisis, estos datos no suelen ser conocidos, si bien se intentará aportar una visión general que permita establecer una sistemática para una primera aproximación a cualquier bóveda.
- Disposición de los rellenos en el trasdós de las bóvedas. Para una correcta clasificación y consideración estructural es necesario acotar las dimensiones de los rellenos en el trasdós de las bóvedas. Se repasan las diferentes geometrías encontradas en los edificios existentes y la disposición habitual de los mismos. De esta manera se acotan los valores medios, extremos y significativos de las variables geométricas respecto de los rellenos datados.
- Explicación sintetizada del comportamiento estructural de los rellenos. De manera conceptual se presentan los principales efectos beneficiosos que provocan los rellenos en la estabilidad de las bóvedas.

Para finalizar el artículo se presentan unas conclusiones preliminares del estudio que se está llevando a cabo.

## 2. CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE LOS RELLENOS

Los diferentes tipos de rellenos datados en el trasdós de bóvedas de edificios históricos en la Península Ibérica, en el ámbito de este estudio, pueden clasificarse, según su morfología, de la siguiente manera:

### 2.1. Relleno rígido o cementado

Es el situado generalmente sobre el arranque de las bóvedas, aunque en ocasiones puede llegar hasta una buena altura. Está formado, bien por materiales de diferentes granulometrías (en general medios o gruesos) unidos con un material ligante (cemento romano formado con puzolana o cal y canto) o bien por la propia fábrica de la bóveda.

En la Figura 3a se puede ver el Mausoleo de Llanes en Albendea (Cuenca). Se trata de una construcción de la etapa final del imperio romano. En la imagen se ha marcado con trama gris la bóveda de cuarto de

3. a) Mausoleo romano de Llanes en Albendea (Cuenca).  
b) Termas romanas de Guadalmar (Málaga).

Fotografía: [www.sobremalaga.com](http://www.sobremalaga.com)

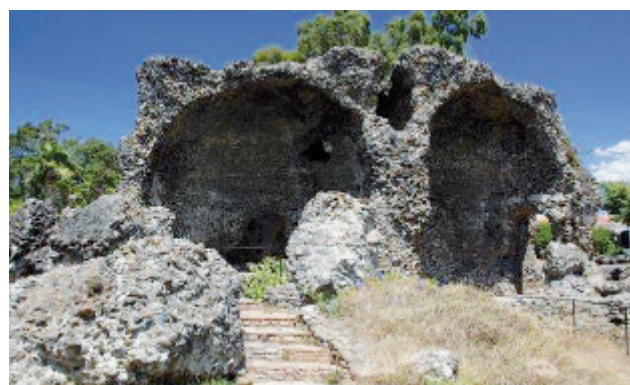
4. a) Ruinas de la iglesia de Matute (La Rioja).

Fotografía: [www.aytomatute.org](http://www.aytomatute.org).

b) Ruinas de la ermita de Nuestra Señora de Vallverd en Tragó de Noguera (Lleida).



3a



3b



4a



4b



5. a) Ruinas del monasterio de Bonaval en Retiendas (Guadalajara).  
b) Ruinas de la iglesia de Sant Bartomeu de Pugis (Lleida).



5a



5b

esfera que permanece en pie y con trama rallada el relleno rígido (hormigón romano en este caso) que permanece en el trasdós de la misma.

En la Figura 3b se pueden ver las bóvedas de las termas romanas de Guadalminar en Marbella (Málaga). En este caso la bóveda y el relleno configuran un todo único ya que se trata de unas bóvedas formadas únicamente por un hormigón romano. Como se observa, el relleno se sitúa hasta una altura superior a la clave. Se trata de una configuración típica de edificios romanos en los que la planta sobre la bóveda tenía uso.

En la Figura 4a se observa el presbiterio en ruinas de la iglesia de Matute (La Rioja). Se trata de una bóveda de cuarto de esfera. En la imagen se observa la plementería de la bóveda y el relleno rígido que llega hasta una altura algo por encima de la mitad de la flecha. A diferencia de los edificios romanos con esta tipología de relleno, el sistema de contrarresto (muros y contrafuertes) es menos masivo.

En la Figura 4b se observan las ruinas de la ermita de Nuestra Señora de Vallverd en Tragó de Noguera (Lleida). Se trata de la ruinas de un antiguo convento románico. Se ha empleado el mismo código de colores que en la figura anterior para mostrar el relleno rígido del trasdós que, como se observa en esta imagen, llega a una altura considerable. Es interesante comprobar que, aun habiéndose perdido la plementería de la propia bóveda, se conserva el relleno rígido del trasdós, circunstancia que revela que, en este caso al menos, es el relleno el que asume un papel estructural protagonista en solitario.

## 2.2. Relleno granular firme

Es una transición entre el relleno rígido y el granular. En general, está constituido por un material granular con tamaños grandes pero sin ligante que los una. Se trataría, pues, de una especie de escollera. En otras ocasiones puede tratarse de la propia

fábrica colocada a "hueso", esto es, sin mortero entre las juntas.

En la Figura 5a se observa en detalle el relleno granular firme dispuesto en el trasdós de una de las bóvedas del presbiterio del Monasterio de Bonaval, situado en el municipio de Retiendas (Guadalajara). En este caso el relleno está formado por la propia fábrica colocada de forma más o menos ordenada y a "hueso" (sin juntas de mortero). Se emplean materiales de mayores o menores dimensiones para adaptarse a las formas de la bóveda.

La Figura 5b muestra el presbiterio de la iglesia de Sant Bartomeu de Pugis (Lleida). Aquí se ve cómo el relleno del interior de los muros sube hasta una altura algo mayor de la mitad de la flecha. Se trata de un relleno compuesto por materiales pétreos de diverso tamaño y forma, sin que exista ligante alguno.

En otros casos este relleno está formado por una especie de escollera con materiales de muy diversa granulometría, en algunos casos mezclándose "bolos" de gran tamaño con granulometrías finas, de forma que se forma un material parecido a un "todo-uno", con buenas propiedades mecánicas.

## 2.3. Relleno granular suelto

Es un relleno granular (arenas o arcillas), sin ligante, esto es, carente de cohesión interna. Se suele situar sobre el relleno rígido hasta las capas de impermeabilización y cubierta, que pueden apoyarse en él.

En la Figura 6a se observa, vista desde arriba, la bóveda de la iglesia Colegial de Talavera de la Reina (Toledo). Con un sombreado rallado se muestra el trasdós de la plementería de la propia bóveda. Con un sombreado gris se han marcado los rellenos granulares dispuestos sobre estas bóvedas. En este caso, el relleno granular llegaba hasta una altura considerable, casi a cota de clave de la propia bóveda, formando una superficie casi horizontal sobre la que transitar.



6a



6b



7a



7b

La Figura 6b muestra el relleno también granular dispuesto sobre las bóvedas de la iglesia de Villamorón (Burgos). En este caso los rellenos granulares, marcados igualmente con trama rallada, superaban ampliamente la cota de coronación de la bóveda que, como en casos anteriores, se ha marcado en gris.

## 2.4. Relleno aligerado

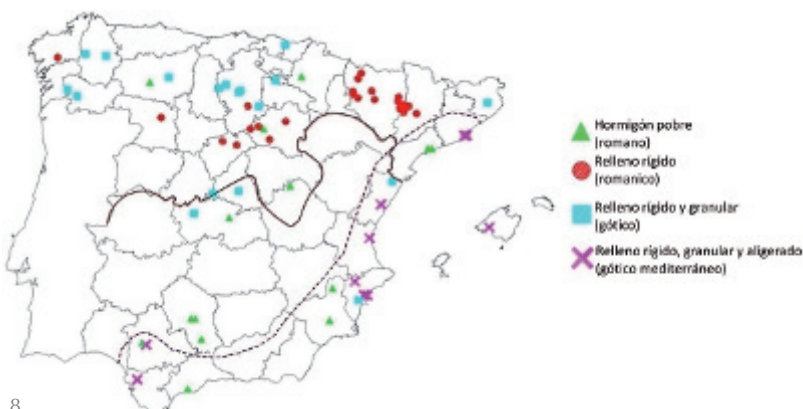
Está formado por vasijas de barro cocidas, huecas y tapadas, entre las que se materializa un relleno con cal y canto formado por arena, cal y trozos de materiales cerámicos. Se sitúa entre el relleno rígido y la cubierta o impermeabilización. Es como el relleno granular pero de una densidad menor, lo que evitará una carga innecesaria en los elementos de sustentación de las bóvedas.

En la Figura 7a, tomada de (7), se observan los rellenos aligerados encontrados en las bóvedas de la iglesia de Santa María en Alicante. Otro ejemplo de este tipo de rellenos aligerados es el mostrado en la Figura 7b, también tomada de (7), que pertenece a las bóvedas de la iglesia de Villafames (Valencia).

## 2.5. Relleno formado por escombros de la propia construcción

En algunas iglesias se pueden encontrar estos escombros como capa superior del relleno. Suele tratarse de restos no retirados de derrumbes anteriores y que, en principio, carecen de cometido estructural, si bien pueden haber pasado a servir como material para ganar cota y sobre el que colocar los acabados de cubierta. Deben considerarse, por tanto, más bien como carga muerta sobre las bóvedas.

La distribución de los rellenos datados de cada tipología se presenta en la Figura 8.



8

De la disposición geográfica de los diferentes tipos de rellenos se pueden destacar diversos aspectos:

1. Puede observarse que las bóvedas con rellenos puramente rígidos (románico) se sitúan por encima de la línea continua que más o menos marca el territorio reconquistado hasta finales del s. XII, en el que comienza la transición hacia el gótico.
2. Los rellenos aligerados se presentan sistemáticamente en bóvedas góticas del arco mediterráneo, que en el mapa anterior se ha marcado con una línea a trazos. Este sistema de aligeramiento ya fue empleado en construcciones del imperio romano. Aunque no puede afirmarse que exista una tradición constructiva que vincule el periodo romano con el gótico mediterráneo, algunos autores (7) (8) justifican esta solución por la necesidad de formar cubiertas planas para evitar la acumulación de agua en los tejados, ya que los arcos de estas edificaciones eran



9. Imagen aérea de la catedral de Sevilla, en la que destacan tanto la enjutas de los arcos fajones de la nave central, claramente visibles, como las cubiertas planas, especialmente las de las naves laterales.

(Tomada de <http://www.bing.com/maps/>)

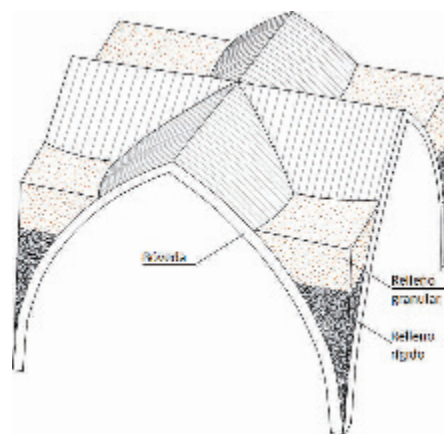
10. Disposición de los rellenos en una bóveda de cañón.

11. Disposición de los rellenos en una bóveda de crucería.

12. Disposición habitual de los rellenos aligerados en una bóveda.

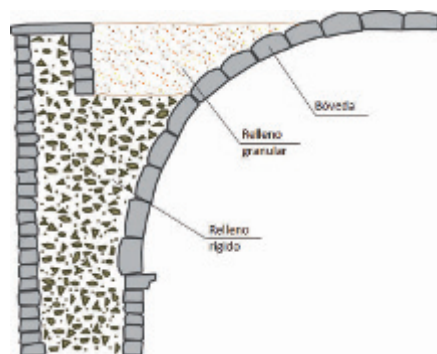


enjutados para constituir una estructura más resistente al situarse estas construcciones en la zona de mayor peligrosidad sísmica de la Península Ibérica, como puede observarse en la Figura 9. Además de la necesidad de construir sobre la bóveda una cubierta aterrazada “plana” (o de poca pendiente) con lo que se eleva el relleno aligerándolo, la existencia de rellenos aligerados puede deberse a la necesidad de disminuir las cargas en algunas zonas. Por ejemplo en las zonas que cargan pilas muy esbeltas como las del gótico mediterráneo.



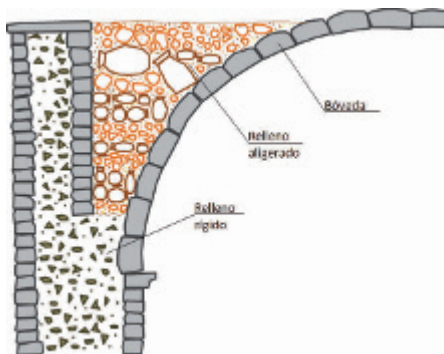
### 3. DISPOSICIÓN DE LOS RELLENOS

En la Figura 10 se esquematiza la disposición de los rellenos en una bóveda de cañón. Como se puede observar, el nivel de relleno rígido se eleva hasta una cota superior de la imposta (arranque de la bóveda en el intradós), y por encima de este relleno puede existir un relleno granular. El denominador común de una buena parte de bóvedas romanas y románicas peninsulares es que estos rellenos rígidos lleguen hasta una cota incluso superior a la mitad de la flecha y que no se presente relleno granular.



10

La Figura 11 esquematiza una bóveda de crucería. Al igual que en la bóveda de cañón, se observa que en la parte inferior de los senos de las bóvedas existen unos rellenos rígidos y, sobre éstos, los granulares sueltos. La altura hasta la que se disponen estos rellenos es elevada, llegándose incluso hasta el trasdós de clave.



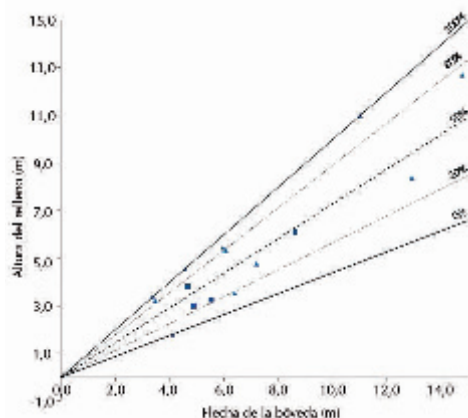
12

En la Figura 12 se ha esquematizado una bóveda, en este caso de cañón, que sirve para identificar la disposición de los rellenos aligerados. Debe notarse que, en general, estos rellenos se disponen en bóvedas de crucería góticas. En la zona inferior, cercana al arranque, al igual que en las bóvedas de crucería con rellenos granulares, se dispone una zona con un relleno rígido. Por encima de éste aparece el relleno “aligerado” descrito, formado por capas de materiales cerámicos huecos y capas de mortero. En general, la altura de estos rellenos es elevada, llegándose incluso hasta el trasdós de clave.

Se ha realizado un análisis de las dimensiones correspondientes a los rellenos de los edificios considerados en el estudio, de manera que se puedan “acotar” las dimensiones más habituales de los mismos en edificios históricos.

En los gráficos que se presentan en este estudio se han marcado, para cada una de las figuras, las siguientes líneas:

- Dos líneas continuas que marcan los límites de máxima (línea marcada con un 100% ya que por debajo de ella están todos los puntos) y mínima pendiente (marcada con el 0% ya que por debajo de la misma no hay ningún punto). Esto quiere decir que entre estas líneas se encuentran todos los datos de la nube de puntos. La pendiente de la línea marcada con el 100% es 1,0; mientras que la pendiente de la línea del 0% es 0,44.
- Una línea de trazos que marca el valor medio de todos los valores existentes (línea marcada con el 50% ya que la mitad de puntos queda por debajo de la misma). En este caso la pendiente de la línea es 0,7.
- Con líneas de puntos se acota el rango de valores que se considera más significativo. Es decir, suponiendo que la nube de puntos presenta una distribución normal, la región que abarca el 60% de los datos, respectivamente. O visto de otra forma, las líneas que dejan por encima o por debajo el 20% de los datos. La pendiente en el caso de la línea marcada con el 80% es de 0,89. La pendiente de la línea del 20% es de 0,57.



13

En la Figura 13 se muestra la relación entre la flecha de la bóveda (en abscisas) y la altura del relleno (ordenadas). Los edificios románicos se marcan en el gráfico con cuadrados, mientras que para los góticos se emplean triángulos. Los edificios de máxima pendiente (mayor altura de relleno) son la catedral de Sevilla, la iglesia de Santa Cecilia en Herrera de Valdecañas (Palencia) y la iglesia de Santa Eulalia en Quintanilla de Vivar (Burgos). La mínima pendiente (menor altura del relleno) corresponde a la iglesia del Hospital de la Caridad en Aguilar de la Torre (Córdoba).

La máxima pendiente se produce en edificios góticos en los que existen rellenos granulares sueltos o rellenos aligerados. La línea de mínima pendiente está asociada a edificios góticos tardíos.

#### 4. COMPORTAMIENTO DE LOS RELLENOS

Las misiones estructurales que se pueden atribuir a los rellenos son las que se describen a continuación:

- Reparto de cargas:  
Cualquier carga aplicada en la superficie de los rellenos se transmite hasta la bóveda con un efecto de reparto de forma que la carga pasa de puntual a ser distribuida en cierta manera al llegar al trasdós de la bóveda. En general se admite, y así se ha podido determinar con modelos numéricos, un reparto a través de conos. Este efecto de reparto es mayor para los relleno más rígidos (reparto con un cono de eje vertical con un semi-ángulo de 45°) y algo menor con rellenos granulares (semi-ángulo de 30°).
- Pre-compresión de las bóvedas:  
El peso propio de los rellenos carga las bóvedas que, gracias a su forma, se comprimen, favoreciendo el trabajo por forma de este tipo de elementos. Estas compresiones tienen un efecto parecido al de un pretensado que centra las cargas. En este sentido, los rellenos de mayor peso específico serán los que más ayuden a las bóvedas.
- Desarrollo de empujes y rozamiento que tienden a estabilizar el sistema:  
El empuje provocado por la acción del relleno sobre una bóveda es un efecto estabilizador y beneficioso. Además de estos empujes, el rozamiento provocado en la interfaz entre el relleno y la fábrica hace que el sistema sea más estable. En ambos casos, el rozamiento y los empujes del relleno, se genera un efecto contrario a la cinemática por la que se provoca el fallo por estabilidad en una bóveda (bajada de la clave y "ascenso" de los riñones).
- Efecto estabilizador frente a cargas asimétricas:  
Bajo la acción de cargas asimétricas se producen movimientos en cualquier bóveda de forma que, en la zona más próxima a la carga, el trasdós de la misma se "aleja" del relleno y el empuje del relleno disminuye acercándose a valores más cercanos al estado activo. Por el contrario, en otras zonas, las más alejadas a la carga asimétrica, el trasdós de la bóveda

13. Caracterización geométrica de los rellenos. Se representa la altura de los rellenos frente a la flecha de las bóvedas consideradas en el estudio. Los puntos marcados con triángulos representan edificios góticos, mientras que los cuadrados representan edificios románicos.

14. Relleno en una bóveda de cañón, delimitado por el muro exterior y la bóveda.

Zona I: en la que se desarrollan empujes según las teorías clásicas  
Zona II: en la que el efecto del empuje se ve reducido al no existir un material indefinido en el trasdós.

15. a) Distribución de empujes según Rankine.  
b) Distribución de empujes considerando la cercanía de paredes paralelas con la teoría de Spangler y Handy.

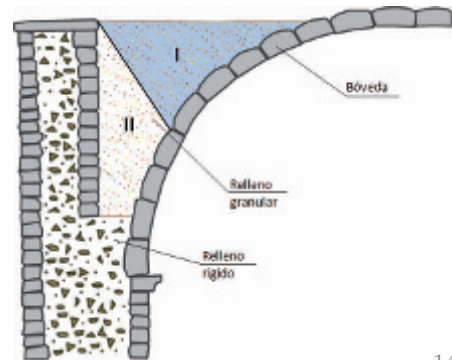
se “acerca” hacia el relleno empujándolo y haciendo que crezcan los empujes acercándose a un estado más cercano al reposo. Este efecto hace que se estabilice el efecto de las cargas, ya que se opone al mecanismo cinemático que provoca el colapso de la estructura.

- Misión cuasi-estructural de los rellenos y disminución de la luz de la bóveda  
Otro aspecto beneficioso sería el de la posible misión estructural del relleno rígido, esto es, que la línea de presiones pueda pasar por el relleno rígido, si este tiene capacidad portante suficiente, parecida a la de la propia fábrica<sup>1</sup> y que no existe un fallo por “rasante” en la junta entre ambos materiales. Además, si como acaba de exponerse, se acepta la misión estructural del relleno rígido, la luz real de trabajo de la bóveda disminuye de forma drástica, lo que ayuda notablemente en la estabilidad del conjunto.
- Verticalización de las reacciones (efecto pináculo)  
El peso de los rellenos dispuestos en las bóvedas hace que la reacción en el arranque de las mismas sea más vertical y, por tanto, sea necesaria una estructura de contención (arbotantes, contrafuertes, botareles...) de aquéllas más pequeña que si no hubiera relleno, ya que, en general, estos elementos no están comprometidos por un nivel tensional alto, sino que su colapso se debe más bien a una falta de equilibrio del sistema.

Al evaluar los beneficios que el relleno supone para asegurar la estabilidad de una bóveda, debe tenerse en cuenta que en los edificios de fábrica el relleno se encuentra confinado entre la bóveda y el muro de contención que se eleva en el exterior y que sirve como apoyo de la cubierta (ver Figuras 10 y 12). El hecho de que este relleno no sea un material homogéneo e indefinido debe ser considerado en su comportamiento estructural, ya que no podrán tenerse en cuenta las teorías clásicas formuladas con la hipótesis de que el material en el trasdós de un elemento de contención es un material homogéneo y continuo.

Como ya se ha anticipado, las teorías clásicas del cálculo de los coeficientes de empuje tienen en cuenta una serie de simplificaciones que, aplicadas a los rellenos, distorsionarían la realidad de su comportamiento. Por ejemplo, en el caso de una bóveda de cañón, el terreno que empuja la bóveda no es indefinido sino que queda delimitado por el muro que lo contiene tal y como se muestra en la Figura 14, en la cual se muestra la zona que a priori parece

que podrá desarrollar los empujes de la teoría clásica (Zona I) y la zona en la que estos empujes deberán reducirse por la proximidad de un elemento rígido (Zona II).



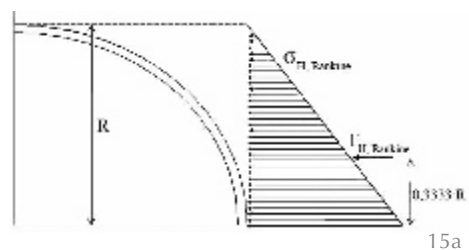
14

Algunas formulaciones teóricas que podrían servir para explicar y cuantificar la reducción de estos empujes podrían ser:

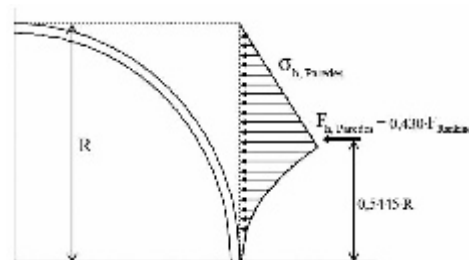
- El efecto de paredes próximas que puede cuantificarse mediante el método expuesto por Spangler y Handy en (9).
- El efecto silo que puede cuantificarse según lo expuesto en la norma ROM 0.5 05 (10).

En la primera de estas formulaciones las tensiones horizontales en el trasdós del muro se corresponden con las tensiones según la teoría de Rankine hasta alcanzar un valor máximo. En el caso concreto de una bóveda de cañón como la de la Figura 15, cada una de las paredes (bóveda a la izquierda y muro de contención de los rellenos a la derecha) cada vez están más próximas y este empuje decrece hasta anularse.

En la Figura 15 se representan los empujes aplicando la teoría clásica de Rankine y la de reducción por existir una pared paralela próxima a la bóveda.



15a



15b

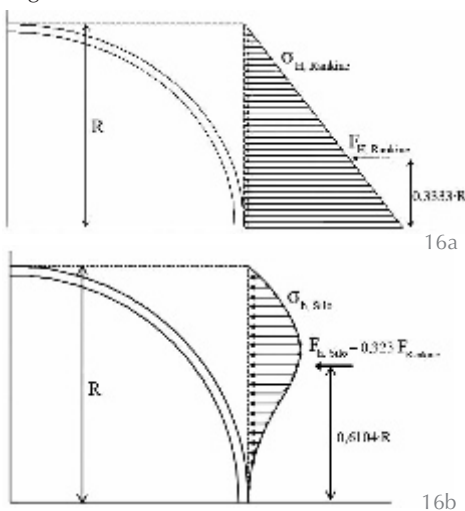
<sup>1</sup> Desde un punto de vista meramente resistente, de equilibrio, como el que se deduce al visualizar las líneas de presión, se trata de que el relleno tenga capacidad portante suficiente, con independencia de la rigidez. Desde un punto de vista más exigente, si el relleno tuviera una rigidez mucho más pequeña que la fábrica, pero tiene capacidad resistente (una arena confinada, p.e., que resiste pero se deforma), el equilibrio resulta aún posible pero a costa de movilizarse una deformación cinemática, casi de sólido rígido, que anuncia, sin producirse, la formación de un mecanismo de colapso. Eso es realmente lo que sucede cuando se advierte la formación de rótulas por movimientos impuestos. La estabilidad, más precaria, se explica por el paso de la línea de presiones por el relleno. Naturalmente, si el relleno no tiene siquiera capacidad resistente, la línea de presiones no puede pasar a su través y el equilibrio ya no es posible.



La razón entre la resultante de las presiones según la teoría de Rankine y según el método propuesto para tener en cuenta la cercanía de una pared rígida es de 0,430. Además, existe una diferencia en el punto de aplicación de estas resultantes. Como es conocido, la resultante de una ley triangular se sitúa a un tercio de la altura total (representada con R en la figura anterior) desde la base. Sin embargo, la resultante teniendo en cuenta la proximidad de una pared rígida se sitúa a una altura del 54,45% de la flecha total.

La otra posibilidad para explicar la reducción de empujes en los senos de una bóveda de crucería, es aplicar al material granular de relleno el mismo efecto que se produce en un silo, teniendo en cuenta la variación que se produce en el ancho.

Aplicando la teoría de silos al caso expuesto, los resultados son los que se aprecian en la Figura 16.



Como en el anterior caso, la relación entre la resultante de las presiones que proporciona la teoría de Rankine y la que da el método propuesto es inferior a la unidad. En concreto de 0,323. También como en el caso anterior se observa la diferencia que existe entre el punto de aplicación de la resultante que se produce para una altura del 61,04% de la altura desde la base.

En la Tabla 1 se resumen las variaciones de la fuerza y su punto de aplicación según se tenga en cuenta la teoría en empuje activo de Rankine, el efecto de muros paralelos cercanos según la teoría de Spangler y Handy y el efecto silo.

**Tabla 1.** Variación del empuje teniendo en cuenta la reducción por proximidad de paredes cercanas.

	Rankine	Spangler	Silo
$F_{h,r}/F_{h,Rankine}$	1,000	0,430	0,323
$H_r/H_{tot}$	0,3333	0,5445	0,6104

## 5. CONCLUSIONES

Sorprendentemente, se ha prestado escasa atención al importantísimo papel de los rellenos en la estabilidad de las bóvedas y a su configuración morfológica.

Dicha configuración morfológica, en la Península Ibérica, puede ser de relleno rígido cementado, relleno granular firme, granular suelto, relleno aligerado y, finalmente, de cascotes y escombros.

La morfología de los rellenos depende asimismo de la época de construcción y de sus tradiciones asociadas. Así, los romanos emplearon rellenos rígidos formados por el mismo hormigón pobre empleado en multitud de construcciones. La cota de estos rellenos rígidos era alta superando en muchos casos la cota de la clave de la bóveda. En el románico se emplearon también rellenos rígidos o granulares firmes. La cota hasta la que se disponían los mismos era en general superior a la mitad de la flecha de las bóvedas y en general bastante cercana a dos tercios de la flecha. Finalmente en el gótico se emplearon rellenos rígidos en las zonas inferiores de las bóvedas (hasta una altura más o menos de media flecha) y por encima de estos y hasta cotas cercanas a la cota de clave, rellenos granulares. En esta etapa, debe destacarse el empleo de rellenos aligerados que se han podido datar en el ámbito de la cuenca mediterránea.

Se hace necesaria la realización de una campaña de caracterización geotécnica de estos rellenos. Con ella se podría hacer una clasificación geotécnica precisa de los mismos. Esta actuación sería tan importante como la de la caracterización morfológica y geométrica realizada.

Se ha evidenciado que es imprescindible considerar el papel de los rellenos en la modelización estructural antes de cualquier intervención sobre los mismos. Esto es así ya que la misión estructural de los rellenos en numerosos casos es imprescindible para asegurar la estabilidad no sólo de las bóvedas sino también del resto de elementos estructurales.

Como se ha expuesto los empujes debidos a los rellenos y sus cotas de actuación en edificaciones históricas tienen la peculiaridad de no tratarse de medios continuos y por tanto los empujes que estos materiales ejercen sobre las bóvedas son cuantitativamente menores (la mitad o menos) que los que desarrollaría un material continuo. Sin embargo la cota de actuación de la resultante de estos empujes es mayor (algo menos que el doble) que la cota de actuación de la resultante del empuje de un material continuo.

16. a) Distribución de empujes considerando la teoría de Rankine.

b) Distribución de empujes considerando el efecto silo.

## REFERENCIAS

- (1) Martínez Martínez, J.L. (2003). Determinación teórica y experimental de diagramas de interacción de esfuerzos en estructuras de fábrica y aplicación al análisis de construcciones históricas (Tesis doctoral) p.471-492. E.T.S.I.C.C.P. de la Universidad Politécnica de Madrid, Madrid. Disponible en: [http://oa.upm.es/339/1/JOSE\\_LUIS\\_MARTINEZ\\_MARTINEZ.pdf](http://oa.upm.es/339/1/JOSE_LUIS_MARTINEZ_MARTINEZ.pdf)
- (2) León González, J., Martínez Martínez, J.L. (2001). *Cúpula del Evangelio en la Iglesia de La Mantería en Zaragoza. Análisis de las causas del colapso y recomendaciones para la intervención en las cúpulas gemelas*, p.18-21. Unidad Docente de Hormigón Estructural de la E.T.S.I.C.C.P. de la Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- (3) Huerta Fernández, S., López Manzanares, G. (2001). *Estudios estructurales previos a la restauración de la iglesia de Santo Tomás de Villanueva ("La Mantería") de Zaragoza*, p.24-27. Instituto de Patrimonio Español, Madrid. Disponible en: [http://oa.upm.es/685/1/Huerta\\_Inf\\_009.pdf](http://oa.upm.es/685/1/Huerta_Inf_009.pdf)
- (4) Espejo Niño, S. (2007). Estudio del comportamiento experimental de dos puentes de fábrica ensayados hasta rotura (Trabajo de investigación tutelado) p.23-28. E.T.S.I.C.C.P. de la Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- (5) León González, J. y Espejo Niño, S. (2007). Load test to collapse on the masonry arch bridge at Urnieta, p.969-976. Proceedings of the 5th International Conference on Arch Bridges.
- (6) Martín Caro Álamo, J. A. (2001). Análisis estructural de puentes arco de fábrica. Criterios de comprobación (Tesis doctoral) p.170-193. Presentada en la E.T.S.I.C.C.P. de la Universidad Politécnica de Madrid, Madrid. Disponible en: <http://oa.upm.es/647/1/04200107.pdf>
- (7) García Valldecabres, J. (2010). La métrica y las trazas en la Iglesia de San Juan del Hospital de Valencia (Tesis doctoral) p.98. E.T.S. de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Valencia, Valencia. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/8381>
- (8) Cassinello Plaza, M. J. (2005). Racionalidad sísmica en la arquitectura ojival: tipos estructurales y constructivos, p.249-258. Actas del Cuarto Congreso Nacional de Historia de la Construcción. Disponible en: [http://gilbert.aq.upm.es/sedhc/biblioteca\\_digital/Congresos/CNHC4/CNHC4\\_025.pdf](http://gilbert.aq.upm.es/sedhc/biblioteca_digital/Congresos/CNHC4/CNHC4_025.pdf)
- (9) Spangler, M.G., Handy, R.L. (2007). *Geotechnical Engineering. Soil and Foundations Principles and Practice*, p.551-553. MacGraw Hill, New York.
- (10) ROM 0.5-05. (2005). Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias, p.318-319. Puertos del Estado, Madrid. Disponible en: [http://www.puertos.es/programa\\_rom/rom\\_05\\_05.html](http://www.puertos.es/programa_rom/rom_05_05.html)

\* \* \*